

文章编号:1673-5005(2009)06-0046-06

脉冲中子-中子测井影响因素的数值模拟

张 锋^{1,2}, 王新光^{1,2}

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油大学 CNPC 测井重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘要:利用蒙特卡罗方法建立各种条件下的套管井计算模型,模拟相应的热中子时间谱,进而计算地层宏观吸收截面。模拟结果表明:地层的宏观吸收截面随着孔隙度和含水饱和度的增加而增加,且源距越小、地层水的矿化度和泥质含量越高、套管的尺寸越大、仪器越居中、俘获截面越高的岩性地层条件下,地层的宏观吸收截面也越大;套管壁厚和水泥环对地层宏观吸收截面没有影响,但套管壁越厚、水泥环厚度越小,热中子总计数越低。利用脉冲中子测井数据确定地层含水饱和度时应对各种影响因素作相应的校正。

关键词:脉冲中子-中子测井; 含水饱和度; 地层宏观吸收截面; 蒙特卡罗模拟
中图分类号:P 631.817 **文献标识码:**A

Numerical simulation for influence factor of pulsed neutron-neutron logging

ZHANG Feng^{1,2}, WANG Xin-guang^{1,2}

(1. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;
2. CNPC Key Laboratory of Well Logging in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: The calculation models under the condition of different cased well situation were established by Monte Carlo method, and the relevant thermal neutron time spectrum was simulated. The formation macroscopic cross section was also calculated. The results show that the formation macroscopic cross section increases with porosity and water saturation increasing, and the thermal capture capability is powerful under the condition of small spacing, high salinity and shale content, large cased size, centralized tool and high capture lithology formation. The thickness of the casing and the cement do not affect formation macroscopic absorption cross section, but the bigger the casing thickness and the smaller the cement thickness, the lower the total count of the thermal neutron. It must be corrected for different influential factor when the formation water saturation is determined by pulsed neutron logging data.

Key words: pulsed neutron-neutron logging; water saturation; formation macroscopic cross section; Monte Carlo simulation

我国油田已进入高含水期,剩余油的分布规律精细描述相应开展了很多工作^[1-3],而常规生产测井技术已经不能满足需求,特别是对储层动态的监测提出了许多新的要求。目前世界上较为先进和广泛使用的套管井剩余油饱和度测井仪器有脉冲中子衰减-能谱测井仪(PND-S)、储层饱和度仪(RST)、储层监测仪(RMT)和储层动态监测仪(RPM)^[4-6],通过探测非弹伽马能谱和伽马时间谱来确定饱和度。脉冲中子-中子测井仪(PNN)^[7-11]是通过远、近两个

He-3计数管探测热中子时间谱获得地层宏观吸收截面,进而确定饱和度的新一代套管井储层评价测井技术,由于其不受本底的影响,在低地层水矿化度和低孔隙度地层具有优势,但各种井眼和地层因素对PNN测井的影响需要做更进一步的研究。笔者利用蒙特卡罗方法^[12-16]模拟不同源距、套管尺寸、套管壁厚、水泥环厚度、岩性、泥质含量、地层水矿化度、饱和度、孔隙度等条件下的热中子时间谱,研究地层宏观吸收截面与各种因素的响应关系,为脉冲

收稿日期:2009-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(40774058)

作者简介:张锋(1970-),男(汉族),山东莒南人,副教授,博士,从事核测井方法及蒙特卡罗模拟研究。

中子测井技术的解释提供理论支持。

1 蒙特卡罗模拟方法

MCNP 是一种能够模拟连续能量的粒子在任意几何形状的模型中输运且与时间相关的大型通用蒙特卡罗模拟软件,主要包括中子、光子、电子、中子/光子和光子、电子的联合输运,在核测井、医学、工业等领域得到了广泛的应用。模拟时建立相应的计算模型,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过程。

为了减少模拟计算时间,每种情况的模拟计算过程先采用权窗产生器 WWC 卡产生计数的最佳重要性函数,通过估算相空间的平均重要性用于以后计算的权窗参数 WWP 卡。模拟时追踪的历史中子数目为 1×10^7 ,每一时间道热中子计数的最大误差不超过 6%,总计数误差小于 0.3%,符合 MCNP 模拟计算所要求的精度,计算时间为 80 min 左右。

2 计算模型及数据处理方法

根据实际套管井特点建立计算模型:井眼直径为 20 cm,套管外径为 139.7 mm;水泥环的厚度为 3 cm,物质成分为 CaSiO_3 ,密度为 1.95 g/cm^3 ;地层为径向半径 10~70 cm,高 120 cm 的圆柱,把整个地层划分成环距为 7.5 cm、厚度 5 cm 的相邻栅元,地层分别填充不同岩性和流体的物质;测井仪器外径为 45 mm,脉冲中子源处于仪器下端 15 cm 处,脉冲宽度为 $3 \mu\text{s}$,源距分别为 42.5 cm 和 72.5 cm。为了简化模拟过程,没有考虑热中子探测器 He-3 管的响应,中子源和探测器间放置理想屏蔽体,如图 1 所示。模拟时选取的截面数据库为 ENDF/B-VI.0,采用 F4 栅元计数方式,记录热中子的时间谱道宽为 $30 \mu\text{s}$,时间谱记录范围为 $30 \sim 1800 \mu\text{s}$,得到相应源距处的热中子时间谱。

由于 PNN 测井方法热中子计数时间谱的时间道宽为 $30 \mu\text{s}$,为了充分利用道计数,减少统计涨落引起的误差,计算地层宏观吸收截面时采取计数点在谱线上滑动求热中子寿命,最后再取平均的方法。具体做法是,首先避开井眼的影响选择合适的初始时间道,其次选择 30 道计数,把数据分为 5 组,每 6 道作为一组,每一组内相应道内的热中子计数分别表示为 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 和 N_6 ,分别计算时间道 1 和 4,2 和 5,3 和 6 以及 1 和 6 的热中子寿命,再取

平均值,公式为

$$\tau_j = \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{t_{i+3} - t_i}{\ln N_i - \ln N_{i+3}} + \frac{t_6 - t_1}{\ln N_1 - \ln N_6} \right) = \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{90}{\ln N_i - \ln N_{i+3}} + \frac{150}{\ln N_1 - \ln N_6} \right) \quad (1)$$

最后根据求得的热中子寿命,得到地层的宏观吸收截面 Σ 为

$$\Sigma = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \Sigma_j = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \frac{4545.5}{\tau_j} \quad (2)$$

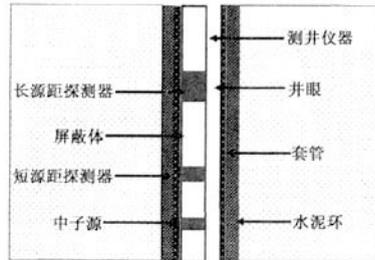


图 1 计算模型

Fig. 1 Simulation model

3 模拟结果

3.1 不同含水饱和度地层的测井响应

模拟条件为:套管外径为 139.7 mm,井眼中充满淡水,地层岩性为纯砂岩,油的密度为 0.85 g/cm^3 ,地层水矿化度为 2%,含水饱和度分别为 0, 30%, 50%, 70% 和 100%,记录短源距处不同孔隙度地层的熱中子时间谱(图 2),得到不同饱和度时的地层宏观吸收截面与孔隙度的响应关系(图 3)。

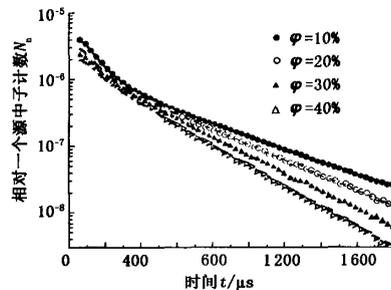


图 2 不同孔隙度饱和含水砂岩地层的熱中子时间谱

Fig. 2 Thermal neutron time spectrum of different porosity sandstone formation with saturated water

不同饱和度地层的宏观吸收截面随孔隙度的增加而增加,其变化比例系数取决于流体和骨架点的宏观截面值。利用图 3 可以确定骨架的宏观吸收截面 Σ_{ms} 。地层水矿化度一定的情况下,孔隙度越大区分油性越灵敏,对测井越有利,反过来确定饱和

度时受孔隙度影响大,需作孔隙度校正。

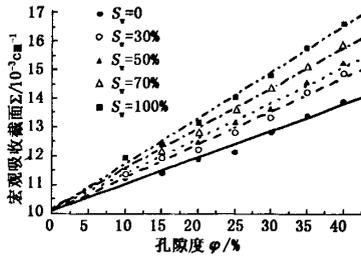


图3 砂岩地层不同含水饱和度时地层宏观吸收截面与孔隙度的关系

Fig.3 Relation of formation macroscopic cross section and porosity for sandstone formation with different saturation

3.2 源距的影响

脉冲中子源产生的快中子进入地层后,经过非弹性散射及弹性散射能量降低,变成热中子。热中子的通量密度不仅是时间的分布函数,而且是空间的分布函数,由于扩散效应的影响,不同源距处的视地层宏观吸收截面与真实值不同,一般源距较小时视宏观吸收截面值大于地层的本征值,而源距较大时视宏观吸收截面小于地层的本征值。

模拟计算时选取并眼条件相同,即套管的尺寸相同和并眼内充满淡水,地层为孔隙中分别饱含油和2%盐水的砂岩,记录长、短源距处不同孔隙度地层的热中子时间谱,处理得到两种源距处的地层宏观吸收截面与孔隙度的关系见图4(其中,O代表饱含油地层,W代表饱含水地层)。

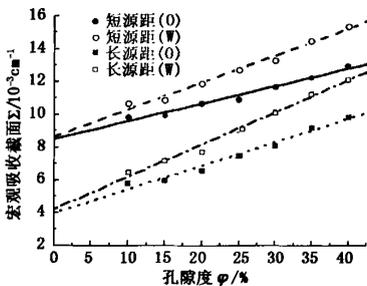


图4 不同源距处地层宏观吸收截面与孔隙度的关系

Fig.4 Relation of formation macroscopic cross section and porosity in different spacing

从图4可以看出:①在纯岩石地层,饱含水和油地层的宏观吸收截面都与孔隙度呈线性关系,孔隙度越大,油水层的宏观吸收截面差别越大;②由于扩散效应的影响,长源距处的地层宏观吸收截面值比短源距处的小得多,但反映的变化趋势相同;③长源

距对应的探测范围深,其地层宏观吸收截面值随着孔隙度的变化比短源距的变化快。显然 PNN 测井仪测井得到的长短源距处地层宏观截面值不同,源距越大,热中子计数率越低,造成的统计涨落误差越大,因此越不利于确定地层含水饱和度。

3.3 地层水矿化度的影响

计算模型的孔隙中饱含流体分别为油和矿化度为0,1%,2%,3%,4%,5%的盐水以及气的砂岩地层,记录短源距处相应的热中子时间谱,得到的地层宏观吸收截面与孔隙度的关系见图5。

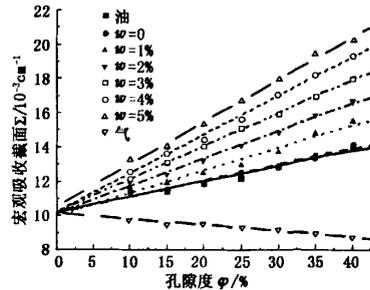


图5 地层流体不同时地层宏观吸收截面与孔隙度的关系

Fig.5 Relation of formation macroscopic cross section and porosity for different fluid

由图5可知,饱含水和油地层的宏观吸收截面随孔隙度的增加而增加,地层水的矿化度越高,变化越大;饱含气层的宏观吸收截面随孔隙度的增加而减小,原因是天然气对热中子的俘获能力比骨架小,随着孔隙度的增加这种差异也越明显。显然,地层水的矿化度越高越有利于区分含水饱和度,但矿化度太高会造成热中子计数率降低,统计涨落增大,因此利用 PNN 测井仪确定储层的含水饱和度时地层水的矿化度影响较大,进行测井解释时须准确确定地层水的矿化度。由于不受本底的影响,在较低矿化度地层 PNN 测井技术具有优势。

3.4 套管的影响

同样不同套管外径条件下,水泥环厚度不变,相应地层径向厚度仍为60cm,高为120cm的砂岩地层,孔隙中分别饱含油和2%的盐水,由热中子时间谱得到相应的地层宏观吸收截面与孔隙度的关系如图6所示。

从图6可以看出,随着并眼套管尺寸增加,地层宏观吸收截面曲线上移,但随孔隙度的变化趋势基本相同,说明并眼尺寸越大,并眼中存在的流体越多,扩散效应越明显。因此,套管尺寸只影响宏观截面的绝对值,对区分油水层不产生影响,在测井解释

时需要套管尺寸的影响作校正。

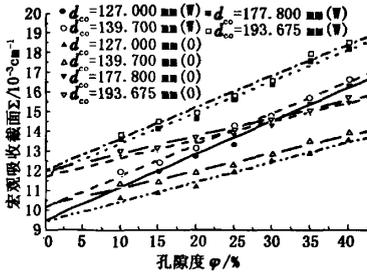


图6 套管尺寸不同时砂岩地层宏观吸收截面与孔隙度的关系

Fig. 6 Relation of formation macroscopic cross section and porosity for different casing size

套管的外径不变,仍为 139.7 mm,壁厚不同,井眼内充满淡水,地层为孔隙度 30% 分别饱含油和 2% 盐水的砂岩,记录相应的热中子时间谱,得到的热中子总计数和地层宏观吸收截面列于表 1 中。

表 1 不同套管壁厚时的地层热中子参数

Table 1 Formation thermal neutron parameter for different thickness of casing

套管壁厚 / mm	饱含油地层宏观吸收截面 $\Sigma_o / 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	饱含盐水地层宏观吸收截面 $\Sigma_w / 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$	饱含油热中子总计数 / 10^{-5}	饱含盐水热中子总计数 / 10^{-6}
6.20	11.279	13.304	1.14896	10.4180
6.98	11.169	13.484	1.10430	10.0148
7.72	11.515	13.530	1.07133	9.74503
9.17	11.520	13.582	1.00191	9.19148
10.54	11.562	13.484	0.957515	8.72736

注:热中子总计数为相对一个源中子的计数。

从表中数据可以看出,套管壁厚对地层宏观吸收截面的影响很小,主要是由于计算地层宏观吸收截面时选取合适的初始时间道避开了井眼的影响,但是套管壁越厚对热中子的俘获能力越强,热中子计数越小,因此不同壁厚的套管对利用地层宏观吸收截面识别地层流体没有影响,但会影响热中子时间谱的道计数。

3.5 仪器偏心的影响

地层模型条件不变,而测井仪器在井眼中居中、偏心 2 cm 和贴井壁 3 种情况下短源距处饱含盐水和饱含油砂岩地层的宏观吸收截面与孔隙度的关系曲线见图 7。

从图 7 可看出,仪器在井中的位置不同,测量得到的地层宏观吸收截面值不同,贴井壁时测量结果最小,居中时测量结果最大,由于贴井壁测量时仪器的探测范围大,井眼的影响小,对地层流体不同引起的变化灵敏。实际测井过程中由于 PNN 测井仪没

有推靠器,不能保证贴井壁测量,会对测量结果产生一定的影响,所以要求测井时尽可能贴井壁测量。

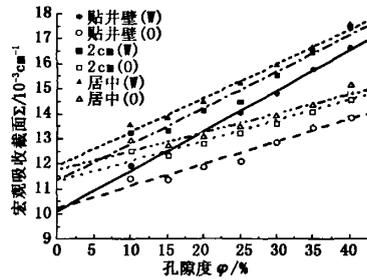


图7 测井仪位置测井结果的影响

Fig. 7 Impact of measurement position of tool upon logging results

3.6 岩性和泥质含量的影响

骨架分别选取砂岩和石灰岩,孔隙中饱含油和 2% 的盐水,记录两种地层短源距处的热中子时间谱,通过对时间谱的处理得到两种地层的宏观吸收截面与孔隙度的关系曲线见图 8。

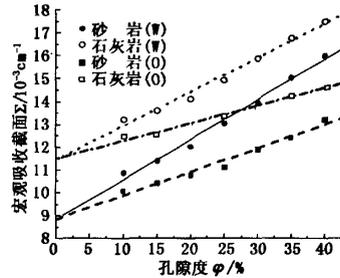


图8 不同岩性地层的宏观吸收截面与孔隙度的关系

Fig. 8 Relation of formation macroscopic cross section and porosity for different lithology

由图 8 看出,岩性不同,对热中子的俘获能力不同:纯石灰岩地层的宏观吸收截面比纯砂岩地层宏观吸收截面大;交会图中纵截距对应的点表示骨架点,利用其对应值可以确定不同岩石矿物的宏观截面;相对纯砂岩地层,纯石灰岩地层骨架与流体的热中子俘获能力差别小,地层宏观截面随孔隙度的变化比砂岩平缓。显然砂岩地层中含有灰质矿物成分越多,对饱和度的影响越大,越不利于区分油性,因此在处理时必需对岩性作相应校正。

由于泥质中含有的粘土矿物对热中子的俘获能力强,为研究泥质含量对地层宏观吸收截面的影响,选取泥质砂岩,孔隙中分别饱含油和 2% 盐水,泥质成分主要包括石英、高岭石、蒙脱石、绿泥石和黑云母,其质量百分比分别为 15%, 15%, 15%, 30% 和

25%, 泥质中水的相对体积为 20%。不同泥质含量时的地层宏观吸收截面与孔隙度关系如图 9 所示。

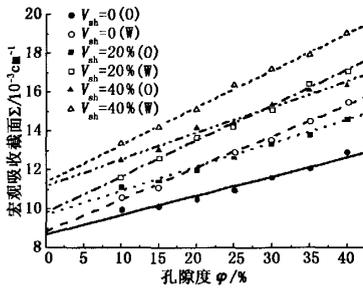


图 9 不同泥质含量时地层宏观截面与孔隙度的关系

Fig. 9 Relation of formation macroscopic cross section and porosity for different shale content

图中反映出泥质含量一定时地层的宏观吸收截面随孔隙度的增加线性增加; 在地层流体相同的情况下, 不同泥质含量的地层宏观吸收截面随孔隙度变化的快慢相同, 即泥质含量只影响骨架宏观截面值, 地层油水反映的宏观截面差值不变; 泥质含量和地层含水饱和度增加都会引起的地层宏观吸收截面增加, 对区分地层的油水性不利, 因此在实际数据处理时先要根据裸眼井资料对泥质进行校正。

3.7 水泥环厚度的影响

套管和井眼条件不变, 水泥环的厚度分别为 1, 2, 3 和 4 cm, 地层为不同孔隙度饱含 2% 盐水和油的砂岩, 记录短源距处的热中子时间谱, 计算得到的地层宏观吸收截面及饱含油地层的热中子总计数分别示于表 2 和 3 中。

表 2 不同水泥环厚度时的地层宏观吸收截面

Table 2 Formation macroscopic cross section for different cement thickness 10^{-3} cm^{-1}

孔隙度 $\phi/\%$	1 cm		2 cm		3 cm		4 cm	
	油	2% 水						
10	9.21	10.084	9.302	10.044	9.343	10.162	9.354	10.098
15	9.466	10.577	9.669	10.854	9.738	10.769	9.601	10.688
20	10.006	11.377	10.16	11.528	10.082	11.697	10.193	11.521
25	10.71	12.248	10.637	12.476	10.676	12.492	10.897	12.525
30	11.116	13.448	11.31	13.731	11.308	13.52	11.313	13.466
35	11.991	14.287	11.988	14.455	11.862	14.46	11.909	14.25
40	12.792	15.518	12.6	15.635	12.773	15.281	12.562	15.258

显然, 水泥环厚度对利用热中子时间谱计算的地层宏观吸收截面影响很小, 在误差范围之内几乎不发生变化, 因此不同厚度的水泥环对地层流体的识别没有影响。

从表 3 可以看出: 孔隙度越大的地层对热中子

的俘获能力越强, 热中子总计数越低; 随着水泥环厚度的增加, 同一地层的热中子总计数也随着增加, 且地层孔隙度越大, 热中子总计数变化越大。以孔隙度为 10% 和 40% 为例, 厚度为 4 cm 的水泥环比 1 cm 时的热中子总计数分别提高了 11.02% 和 36.14%, 这是水泥环和地层对热中子俘获能力的差异引起的, 水泥环厚度越小, 相应测井仪器附近的地层介质俘获热中子能力越强, 因此水泥环的厚度会对热中子时间谱的道计数有影响, 水泥环厚度越大, 道计数越高, 但反过来探测深度会变小, 不利于地层流体的评价。

表 3 不同水泥环厚度下饱含油地层热中子计数

Table 3 Thermal neutron count in saturated oil formation of different cement thickness 10^{-5}

孔隙度 $\phi/\%$	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
10	1.57748	1.64325	1.70472	1.75129
15	1.36394	1.43291	1.50530	1.56455
20	1.18712	1.27061	1.34308	1.40813
25	1.03900	1.13522	1.21291	1.28754
30	0.932032	1.01849	1.10462	1.19007
35	0.840674	0.923653	1.01836	1.09897
40	0.755983	0.845161	0.940838	1.02917

4 结 论

(1) 脉冲中子-中子测井记录热中子时间谱获取地层宏观吸收截面确定含水饱和度, 不受自然本底的影响。

(2) 地层的宏观吸收截面随着孔隙度、含水饱和度的增加而增加, 且源距越小, 地层水的矿化度高、套管尺寸越大、仪器越居中、俘获截面越高岩性地层以及泥质含量越高时, 地层的宏观吸收截面值越大。

(3) 选取合适的初始时间道, 可使套管壁厚和水泥环对地层宏观吸收截面影响减小, 且不影响确定地层的含水饱和度, 但是会影响热中子时间谱的道计数, 套管壁越厚、水泥环的厚度越薄, 热中子计数越低。利用脉冲中子测井确定地层的含水饱和度过程中必须对各种影响因素做出相应的校正, 以提高测井解释的准确性。

参考文献:

[1] 高博禹, 彭仕宓, 黄述旺, 等. 高含水期油藏精细数值模拟研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(2): 11-15.

GAO Bo-yu, PENG Shi-bi, HUANG Shu-wang, et al.

- Fine numerical simulation of the reservoir at high water cut period [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2005,29(2):11-15.
- [2] 高建,侯加根,林承焰,等. 特低渗透砂岩油藏剩余油分布的主控因素及有利区块评价[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*,2007,31(1):11-15.
GAO Jian, HOU Jia-gen, LIN Cheng-yan, et al. Key factors of remaining oil distribution of the lowest permeable sandstone reservoir and favorable area evaluation [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007,31(1):11-15.
- [3] 姜汉桥,谷建伟,陈月明,等. 剩余油分布规律的精细数值模拟[J]. *石油大学学报:自然科学版*,1999,23(5):31-35.
JIANG Han-qiao, GU Jian-wei, CHEN Yue-ming, et al. Fine simulation for distribution of remaining oil in reservoir[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1999,23(5):31-35.
- [4] 张付明. 套管井剩余油饱和度测井技术[J]. *测井技术*,2003,27(增刊):50-55.
ZHANG Fu-ming. Technology of remaining oil saturation logging in casing well [J]. *Well Logging Technology*, 2003,27(sup):50-55.
- [5] MORRIS C, ASWAD T. Reservoir monitoring with pulsed neutron capture logs[R]. SPE 94199,2005.
- [6] 黄志洁,邱细斌. 储层性能监测仪(RPM)及其应用[J]. *石油仪器*,2004,18(2):43-46.
HUANG Zhi-jie, QIU Xi-bin. The reservoir performance monitor and its application [J]. *Petroleum Instruments*, 2004,18(2):43-46.
- [7] 窦殿武,何恩江,安丰春. 新一代套管井储层评价技术:脉冲中子-中子(PNN)测井[J]. *国外油田工程*,2004,20(7):15-16.
DOU Dian-wu, HE En-jiang, AN Feng-chun. A new generation reservoir evaluation technology in casing well: pulsed neutron-nutron logging [J]. *Foreign Oilfield Engineering*, 2004,20(7):15-16.
- [8] 张予生. 一种新的确定储层剩余油饱和度的测井技术[J]. *石油仪器*,2005,19(3):27-31.
ZHANG Yu-sheng. A new logging technology of as certaining saturation of remained oil [J]. *Petroleum Instruments*, 2005,19(3):27-31.
- [9] 赵国海,王志敏,董社霞,等. 脉冲中子-中子(PNN)测井技术[J]. *石油机械*,2005,33(8):75-78.
ZHAO Guo-hai, WANG Zhi-min, DONG She-xia, et al. Pulsed neutron-neutron logging [J]. *China Petroleum Machinery*, 33(8):75-78.
- [10] 邹军. 利用 PNN 储层参数测试技术改善超稠油水平井生产效果[J]. *内蒙古石油化工*,2007,9:62-63.
ZOU Jun. Improving production effect of extra-heavy oil horizontal well by using PNN technology [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2007,9:62-63.
- [11] 张予生. PNN 测井技术在吐哈油田的适应性分析[J]. *海洋石油*,2005,25(4):74-79.
ZHANG Yu-sheng. Analysis of the adaptability of PNN logging technology in Tuha Oilfield [J]. *Offshore Oil*, 2005,25(4):74-79.
- [12] 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[J]. *地球物理学报*,2007,50(6):1924-1930.
ZHANG Feng, XU Jian-ping, HU Ling-mei, et al. Monte Carlo simulation result for the pulsed neutron-neutron logging method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007,50(6):1924-1930.
- [13] 郑华,陈景霞,张谦,等. C/O 测井响应随源距变化的理论研究[J]. *测井技术*,1998,22(2):79-83.
ZHENG Hua, CHEN Jing-xia, ZHANG Qian, et al. A theoretical study on the spacing dependent responses of C/O log [J]. *Well Logging Technology*, 1998,22(2):79-83.
- [14] 吴文圣. 中子 γ 测井仪的中子屏蔽研究[J]. *核电子学与探测技术*,2004,24(1):24-26.
WU Wen-sheng. Neutron shielding study of neutron-photon logging tool [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 24(1):24-26.
- [15] 吴文圣,黄隆基. 三探测器密度测井的 Monte Carlo 模拟[J]. *地球物理学报*,2004,47(1):164-170.
WU Wen-sheng, HUANG Long-ji. Monte Carlo simulation of three-detector density logging [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004,47(1):164-170.
- [16] 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[J]. *地球物理学报*,2005,48(2):459-464.
WU Wen-sheng, FU Geng, ZHANG Zhi, et al. Study of influence factor for dual-detector C/O logging in slim holes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005,48(2):459-464.

(编辑 修荣荣)